

激光冲击与喷丸复合强化对 TC4 钛合金细节疲劳 额定强度截止值 DFR_{cutoff} 的影响

刘亚鹏^{1,2}, 史志俊³, 赵一昭^{1,2}, 朱亮³, 刘马宝^{1,2,4*}

¹西安交通大学航天航空学院, 陕西 西安 710049;

²西安交通大学机械结构强度与振动国家重点实验室, 陕西 西安 710049;

³中国航空工业集团公司西安飞机设计研究所, 陕西 西安 710089;

⁴陕西省先进飞行器服役环境与控制重点实验室, 陕西 西安 710049

摘要 为研究激光冲击与喷丸复合强化对 TC4 钛合金疲劳性能的影响,在测试不同强化工艺状态(未强化状态、喷丸强化状态、激光冲击强化状态、激光冲击与喷丸复合强化状态)TC4 钛合金表面残余应力的基础上,进行了细节疲劳额定强度截止值(DFR_{cutoff})试验,并利用 ABAQUS 有限元仿真分析其表层残余应力分布。试验结果表明:复合强化 TC4 钛合金的表面残余压应力和 DFR_{cutoff} 最大,相比于未强化状态分别提高了 189.1% 和 62.3%。仿真结果表明:表面处理会在试样表面形成残余压应力,激光冲击与喷丸复合强化状态试样的表面残余压应力最大,喷丸强化试样的次之,激光冲击强化试样的最小;激光冲击与喷丸复合强化试样中的残余压应力层最深,激光冲击强化试样的次之,喷丸强化试样的最浅。结合试验结果与有限元分析可知,TC4 钛合金的 DFR_{cutoff} 与表面残余压应力和残余压应力层深度呈正相关。

关键词 激光技术; TC4 钛合金; 喷丸强化; 激光冲击强化; 复合强化; DFR_{cutoff} ; 残余应力

中图分类号 TG17

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202047.0502006

Cut-Off Value of Detail Fatigue Rated Strength of TC4 Titanium Alloy with Compound Strengthening Treatment by Laser Shock Peening and Shot Peening

Liu Yapeng^{1,2}, Shi Zhijun³, Zhao Yizhao^{1,2}, Zhu Liang³, Liu Mabao^{1,2,4*}

¹School of Aerospace Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, Shaanxi 710049, China;

²State Key Laboratory for Strength and Vibration of Mechanical Structures, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, Shaanxi 710049, China;

³The First Aircraft Design and Research Institute, Aviation Industry Corporation of China, Xi'an, Shaanxi 710089, China;

⁴Shaanxi Key Laboratory of Advanced Aircraft Service Environment and Control, Xi'an, Shaanxi 710049, China

Abstract To study the fatigue properties of TC4 titanium alloy subjected to compound strengthening treatment by laser shock peening and shot peening, surface residual stress and cut-off value of detail fatigue rated strength (DFR_{cutoff}) were measured for TC4 titanium alloy for various surface-strengthening cases. These cases included untreated state, shot peening, laser shock peening, and compound strengthening by shot peening and laser shock peening. Additionally, the distribution of residual stress was analyzed by ABAQUS software. Test results show that samples treated by compound strengthening exhibit the highest values of both the surface residual compressive stress and DFR_{cutoff} , with an increment of 189.1% and 62.3% over those of untreated samples, respectively. Simulation results indicate that residual compressive stress can form on the sample surface after the strengthening process, and the surface residual compressive stress on the compound-strengthened surface is the highest, followed by the samples subjected to shot peening and laser shock peening. Moreover, the residual compressive stress layer created by the compound strengthening treatment is the deepest, followed by that for laser shock peening and finally shot peening. From the

收稿日期: 2019-09-14; 修回日期: 2019-11-07; 录用日期: 2019-12-19

基金项目: 陕西省重点研发计划(2018ZDCXL-GY-03-01)、航空科学基金(20163470003)

* E-mail: mliu@xjtu.edu.cn

combined results of tests and finite element analysis, it can be concluded that the DFR_{cutoff} of TC4 titanium alloy is positively correlated with the surface residual compressive stress and depth of the residual compressive stress layer.

Key words laser technique; TC4 titanium alloy; shot peening; laser shock peening; compound strengthening; cut-off value of detail fatigue rated strength; residual stress

OCIS codes 160.3900; 160.0160

1 引 言

TC4 钛合金具有耐蚀性好、密度小、比强度高等一系列优点,已被广泛应用于制造航空发动机、航空架构等重要部件^[1-2]。如何提高钛合金结构的疲劳强度是一个经久不衰的话题。细节疲劳额定值 DFR 是结构细节本身固有的疲劳性能特征值,是当应力比 $R=0.06$ 时,结构细节寿命具有 95% 置信度和 95% 可靠度,能够达到 10^5 次循环寿命的最大应力。细节疲劳额定强度截止值(DFR_{cutoff})是结构件允许使用的最大 DFR 值,适用于应力集中系数较小的不带连接孔的部位,它反映了保护层脱落引起的轻微腐蚀或者制造和修理过程中正常操作可能引起的划伤和擦伤后构件的疲劳品质,在民用飞机疲劳寿命设计及耐久性分析中被广泛应用^[3]。

目前,航天航空工业中主要利用喷丸强化(SP)和激光冲击强化(LSP)来改善零件的疲劳性能。喷丸强化就是将高速弹丸流喷射到零件表面,使零件表层发生塑性变形,从而形成一定厚度的残余压应力层的过程^[4-6]。激光冲击强化则是利用高功率密度、短脉冲激光辐照金属表面涂层时产生的高强度压应力冲击波对金属进行冲击的过程。在此过程中,高的应变率使材料发生绝热剪切滑移,同时,应变率强化和应变硬化的交互作用使材料表层发生塑性变形并形成残余压应力层^[7-9]。一般认为,喷丸强化和激光冲击强化均会引起材料表层发生塑性变形,在材料表层形成一个残余压应力层,从而提高材料的疲劳寿命^[10-12]。目前,国内外在这方面的研究主要集中在喷丸强化或激光冲击强化单独作用时对材料疲劳性能的影响及有限元仿真^[13-14]上。虽然喷

丸强化与激光冲击强化的强化层特征差异较大,但是通过合理的工艺控制,可以有效地实现两种工艺的复合,从而进一步提高材料的疲劳性能。

激光冲击强化后,材料表面的残余压应力小,残余压应力层深,表面粗糙度大,而喷丸强化后材料表面的残余压应力大,残余压应力层浅,表面粗糙度小,因此,两种强化工艺复合后形成的残余压应力层可能具有表面残余压应力大、残余压应力层深的优点。此外,在激光冲击强化后再进行喷丸强化,可以有效降低激光冲击后材料的表面粗糙度。因此,本文研究了不同的表面强化工艺尤其是复合强化对 TC4 钛合金 DFR_{cutoff} 的影响,并将表面残余应力的测试结果与 ABAQUS 有限元仿真分析结果相结合,进一步探讨了表层残余应力对疲劳寿命的影响。

2 试验方法

2.1 试样制备

本试验采用 TC4 钛合金作为研究对象,其化学成分及力学性能如表 1 和表 2 所示,疲劳试样示意图如图 1 所示,喷丸强化和激光冲击强化处理的最小区域如图 2 所示。TC4 钛合金试样的喷丸强化处理在自动化喷丸机上进行,所用弹丸均为铸钢丸,弹丸直径为 0.58 mm,喷丸强度为 0.20~1.30 mmA (mm 表示弧高度试片的变形量,A 表示采用的是 A 类阿尔门试片);激光冲击强化处理所用设备为 Nd:YAG 固体激光器,激光波长为 1064 nm,激光能量为 2.7 J,脉宽为 30 ns,光斑直径为 1.2 mm,激光功率密度为 7.96 GW/cm^2 ,搭接率为 50%,吸收层和约束层分别选用厚度为 0.1 mm 的铝箔和水。试件夹持平台的移动速度为 0.6 mm/s。

表 1 TC4 钛合金的化学成分

Table 1 Chemical composition of TC4 titanium alloy

Component	Fe	C	N	H	O	Al	V	Ti
Mass fraction /%	≤0.30	≤0.10	≤0.05	≤0.015	≤0.20	5.5-6.8	3.5-4.5	Bal.

表 2 TC4 钛合金的力学性能

Table 2 Mechanical properties of TC4 titanium alloy

Tensile strength	Yield strength	Elongation	Elasticity modulus	Density ρ /	Poisson's
σ_b /MPa	$\sigma_{0.2}$ /MPa	δ /%	E /GPa	($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	ratio ν
1012	875	180.5	110	4500	0.34

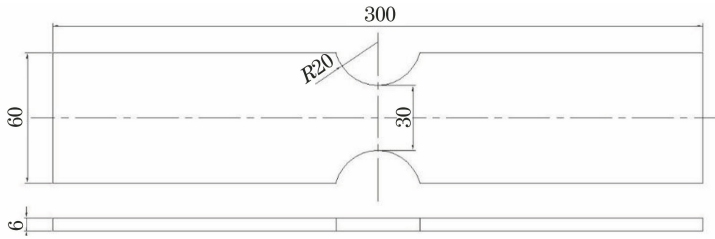


图 1 疲劳试样示意图

Fig. 1 Schematic of fatigue specimen

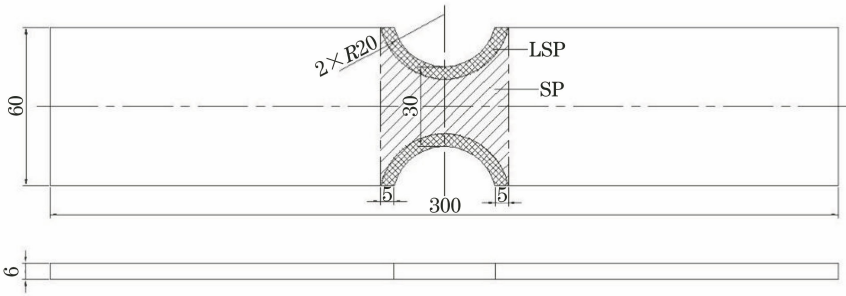


图 2 喷丸强化和激光冲击强化处理区域示意图

Fig. 2 Areas of shot peening and laser shock peening

2.2 残余应力测试试验

本文采用 X 射线衍射法对表面的残余应力进行检测,检测设备为 Bruker -D8-Advance X-Ray 衍射仪。X 射线衍射法是一种无损的测试方法,其基本原理如下:当试样中存在残余应力时,晶面间距将发生变化,发生布拉格衍射,此时产生的衍射峰也会随之移动,并且移动的距离与应力的的大小相关。用 X 射线以不同的入射角 ψ 照射到试样上,测出相应的衍射角 2θ ,然后求出 2θ 对 $\sin^2\psi$ 的直线的斜率,便可计算出应力 σ_ψ 。

2.3 疲劳试验

疲劳试验在 MTS-880/25 型电液伺服万能试验机上进行,以拉-拉正弦载荷谱轴向应力控制加载,应力比 $R=0.06$,试验频率 $f=20$ Hz,试验环境为大气环境。疲劳试验分为四组,四组试样分别是未强化(none)试样、SP 试样、LSP 试样、LSP+SP 试样。TC4 钛合金的 DFR_{cutoff} 测试方法与步骤主要依据 HB 7110—1994^[15] 进行。

3 试验结果

3.1 表面残余应力

残余应力是评估材料疲劳性能的重要因素。图 3 所示为四种强化状态下试样表面的残余应力测试结果,可见:未强化试样表面的残余压应力均值为 240 MPa, SP 试样表面的残余压应力均值为 635 MPa, LSP 试样表面的残余压应力均值为

573 MPa, LSP+SP 试样表面的残余压应力均值为 693 MPa。激光冲击强化、喷丸强化、激光冲击与喷丸复合强化均可提高试样表面的残余压应力,但相比激光冲击强化来说,复合强化提高得更多,试样表面的残余应力最大。在激光冲击强化之后再行喷丸强化,两种工艺产生的残余应力场叠加在一起,使得复合强化后的残余应力可以高于任何一种工艺单独作用时的残余应力。

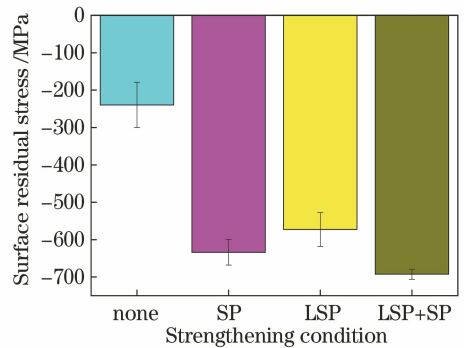


图 3 不同强化状态下试样表面的残余应力分布
Fig. 3 Distribution of surface residual stress in different strengthened samples

3.2 细节疲劳额定强度截止值 DFR_{cutoff}

依据 HB 7110—1994 对四种不同工艺状态下的 TC4 钛合金试样进行规定应力水平下的疲劳试验,可以得到疲劳寿命。

按照威布尔分布分别求出各组试验数据的特征寿命 β , 计算公式为

$$\beta = \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n N_i^\alpha \right]^{1/\alpha}, \quad (1)$$

式中： $\alpha=3$ ； N_i 为第*i*个试样的疲劳寿命； n 为试样的个数。

求可靠度 $R=95\%$ ，置信度 $C=95\%$ 下的寿命，计算公式为

$$N_{95/95} = \frac{\beta}{S_T \cdot S_R \cdot S_C}, \quad (2)$$

式中： S_T 为试样系数， $S_T=1$ ； S_R 为可靠度系数， $S_R=2.7$ ； S_C 可通过查置信度系数表^[15]获得。

得到的试验结果见表3(F_{max} 表示试验中的最大载荷)。

表3 TC4钛合金在不同工艺状态下的疲劳试验结果

Table 3 Fatigue test results of TC4 titanium alloy under different technological conditions

Specimen No.	Strengthening condition	$F_{max}/$ kN	Fatigue life /cycle	Characteristic life /cycle
1-1	None	58	196402	292082
1-2			242423	
1-3			122885	
1-4			139483	
1-5			159143	
1-6			258084	
1-7			76924	
1-8			178027	
2-1	SP	64	119945	241393
2-2			238465	
2-3			229230	
2-4			408671	
2-5			172887	
2-6			135148	
2-7			224636	
2-8			215396	
3-1	LSP	75	265468	288220
3-2			395080	
3-3			220273	
3-4			303785	
3-5			185149	
3-6			263124	
4-1	LSP+SP	80	275190	448980
4-2			523799	
4-3			474698	

根据航空标准 HB 7110—1994，利用单点法求细节疲劳额定强度截止值的公式为

$$DFR_{cutoff} = 0.94\sigma_{mo} / [0.94\sigma_{mo} S^{5-\lg N} / \sigma_{max} - (0.47S^{5-\lg N} - 0.53) - (0.0282S^{5-\lg N} + 0.0318)], \quad (3)$$

式中： $S=2$ ； $\sigma_{mo}=620$ MPa； N 为 $N_{95/95}$ ；

由(3)式计算得到了上述四种不同工艺状态下 TC4 钛合金的 DFR_{cutoff} ，如图4所示。

由图4可知：与未强化试样相比，SP试样、LSP试样、LSP+SP试样的 DFR_{cutoff} 分别提高了16.9%、41.5%、62.3%，其中，复合强化试样在疲劳应力水平提高37.9%的情况下，特征寿命提高了53.7%，有效地改善了结构件的疲劳性能。经三种不同的强化工艺处理后，TC4钛合金试样表层均会形成残余压应力层，当试样受到拉伸载荷作用时，试样表层形成的残余压应力就会抵消掉一部分拉应力，使试样所承受的实际拉应力减小，从而提高试样的疲劳寿命；同时，当试样受到拉-拉循环载荷作用时，残余应力必然会释放，但有研究表明在拉应力下，表面材料发生屈服时才能引起强化表面残余压应力的松弛^[16]。复合强化后形成的表面残余压应力值和残余压应力层的深度，在三种强化方式中都是最大的，因此，复合强化后试样表层的残余压应力是最不容易释放的，疲劳性能也是最好的。

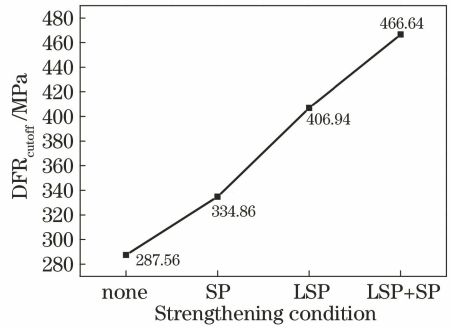


图4 不同工艺状态下 TC4 钛合金的 DFR_{cutoff}

Fig. 4 DFR_{cutoff} of TC4 titanium under different strengthening conditions

3.3 疲劳断口分析

图5所示为四种状态 TC4 钛合金试样的拉-拉疲劳断口形貌，可以看出：未强化试样的疲劳裂纹源(FCD)通常在表面^[17]，而另外三种强化试样的裂纹源均移到了近表面位置，这是由于表面强化使 TC4 钛合金表面形成了残余压应力层，抑制了裂纹在表面的萌生。同时，在深度方向上，由于残余压应力增大到最大值后不断减小并逐渐变为残余拉应力，材料内部的拉应力水平不断增大并大于材料表面的拉应力水平，而疲劳裂纹总是产生在拉应力水平最大的位置^[18]，因此，SP、LSP 和 SP+LSP 试样内部均产生了疲劳裂纹源。如图5(c)所示，LSP 试样的内部和表面均产生了裂纹源，这是由激光冲击强化处

理后材料表面粗糙度增大,材料表面被破坏导致的,并且激光冲击强化材料表面的残余压应力值相对不高,也有利于裂纹的萌生。如图 5(d)所示,复合强化不但进一步提高了材料表面的残余压应力水平,也增大了残余压应力层的深度,并在一定程度上改善了由激光冲击造成的材料表面粗糙度大的缺点,

因此,裂纹在内部拉应力区萌生,并向四周扩展。如图 6 所示,未强化试样疲劳裂纹扩展区面积最小,瞬断区面积最大,而复合强化试样的裂纹扩展区面积最大,瞬断区面积最小。裂纹扩展区面积越大,表明裂纹扩展所需时间越长,疲劳寿命越长,因此,复合强化后试样的疲劳性能最好。

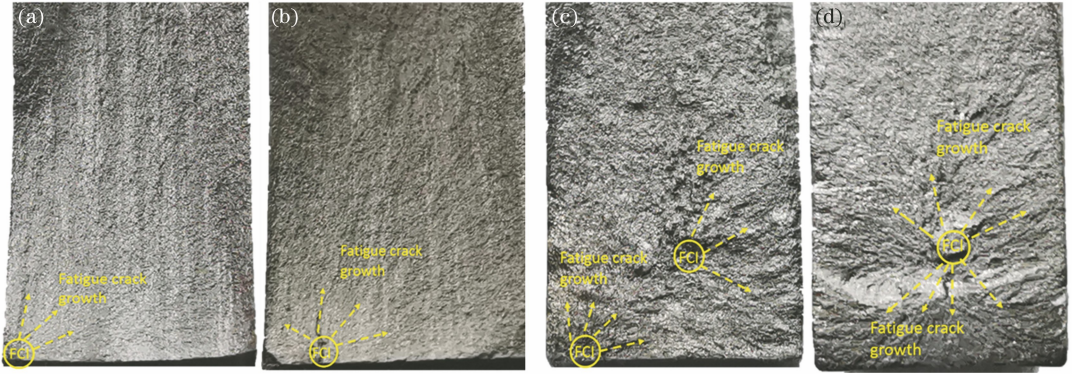


图 5 不同强化状态 TC4 钛合金试样的疲劳断口形貌。(a)未强化;(b) SP;(c) LSP;(d) LSP+SP

Fig. 5 Fatigue fracture morphology of different strengthened TC4 titanium alloy specimens.

(a) None; (b) SP; (c) LSP; (d) LSP+SP

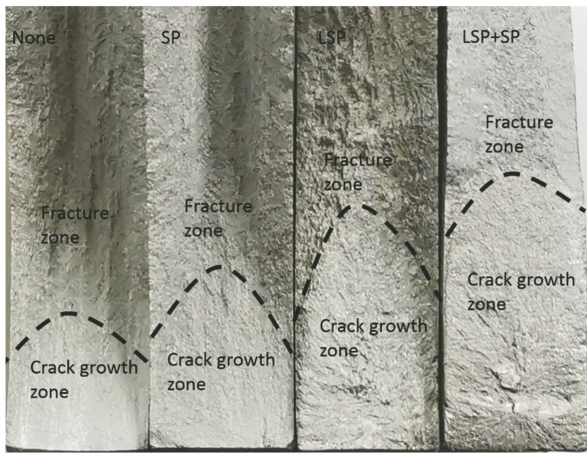


图 6 不同强化状态 TC4 钛合金试样的疲劳裂纹长度

Fig. 6 Fatigue crack length of different strengthened TC4 titanium alloy specimens

TC4 titanium alloy specimens

4 有限元仿真

无论是喷丸强化还是激光冲击强化,都是一个冲击过程。在冲击过程中,材料受应变硬化和应变率硬化的影响较大,因此,仅用静态的力学本构方程来描述材料的物理属性是远远不够的,故本文采用 Johnson-Cook 模型(以下简称“J-C 模型”)对喷丸强化及激光冲击强化过程进行仿真^[19]。J-C 模型一般用于描述大应变、高应变率、高温环境下金属材料的强度极限以及失效过程,能够较好地反映金属材料在高应变率下的力学性能变化,其表达式为

$$\sigma = (A + B\epsilon^n) \left(1 + C \ln \frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0} \right) \left[1 - \left(\frac{T - T_{room}}{T_{melt} - T_{room}} \right)^m \right], \quad (4)$$

式中: σ 为等效应力; A 为材料的屈服强度; B 为材料的硬化模量; C 为应变率常数; $\dot{\epsilon}$ 为等效塑性应变; $\dot{\epsilon}_0$ 为参考应变速率; T 为热力学温度; T_{melt} 为熔融温度; T_{room} 为室温; m 为热敏感性指数; n 为强化指数。

本文采用的 TC4 钛合金的 J-C 本构模型参数如表 4 所示^[20]。

表 4 TC4 钛合金的 J-C 本构模型参数

Table 4 J-C constitutive model parameters of TC4 titanium alloy

Material	A /MPa	B /MPa	C	n	m
TC4	875	793	0.01	0.386	0.71

利用 ABAQUS/Explicit 模拟喷丸和激光冲击作用下的动态响应过程,随后,将 ABAQUS/Explicit 动态分析的应力应变状态导入 ABAQUS/Standard 隐式分析模块,模拟试样动态分析后的回弹过程,获得稳定的残余应力场分布^[21-23]。对于喷丸强化,弹丸选择铸钢丸,其密度为 7.8 g/cm³,弹性模量为 210 GPa,直径为 0.58 mm,速度为 80 m/s。为减小边界条件的影响,将靶材尺寸设置为 10 mm×10 mm×4 mm,求解时间设置为 5×10⁻⁵ s;对于激光冲击强化,设置激光功率密度为 7.96 GW/cm²,光斑直径为 1.2 mm,约束层为水,吸

收层为铝箔,冲击次数为3次,靶材尺寸为 $10\text{ mm}\times 10\text{ mm}\times 4\text{ mm}$ (所有工艺状态下靶材模型尺寸均相同)。单次冲击曲线如图7所示,靶材网格及局部细化网格如图8所示。

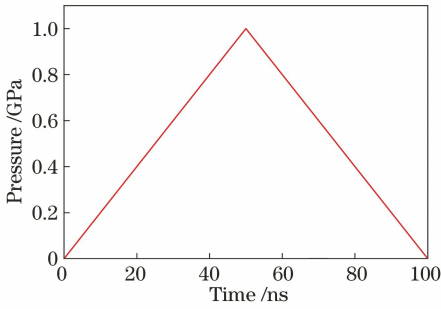


图7 激光冲击强化加载曲线

Fig. 7 Loading curve of laser shock peening

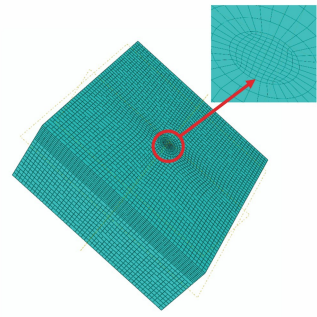


图8 网格模型及局部网格细化

Fig. 8 Mesh model and local mesh refinement

残余应力是评价表面强化试样抗疲劳能力的重要指标。图9所示分别为SP试样、LSP试样及SP+LSP试样中的残余应力分布云图,图10所示为三种试样中残余应力沿深度方向的分布。

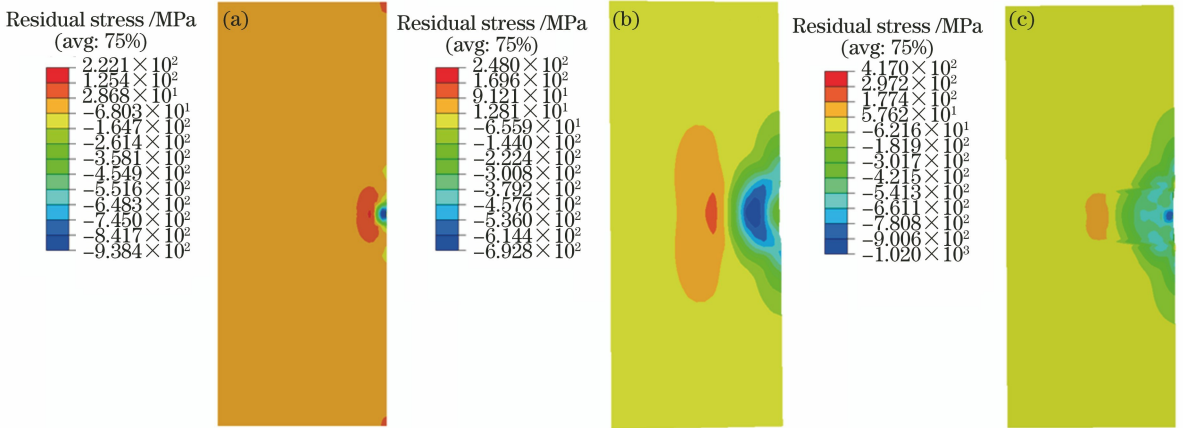


图9 三种强化状态TC4钛合金试样中的残余应力分布。(a) SP;(b) LSP;(c) LSP+SP

Fig. 9 Residual stress distribution in three kinds of strengthened TC4 titanium alloy samples.

(a) SP; (b) LSP; (c) LSP+SP

由图9可知:LSP+SP试样的表面残余应力最大,为 -753.78 MPa ;其次是SP试样,为 -538.06 MPa ;最后是LSP试样,为 -154.98 MPa 。结合表面残余应力测试试验可知,仿真结果与试验结果所得表面残余应力在趋势上是一致的,即LSP+SP试样的最大,SP试样次之,LSP试样最小。仿真结果与试验结果存在一定误差,这是因为:1)未强化试样本身存在一定的残余应力;2)激光与材料相互作用的复杂性导致对冲击波峰值压力的估计存在偏差^[17]。但所测结果与仿真结果趋势的一致性很好地证明了仿真模型的有效性,仿真模型可以用来进一步探讨残余应力沿深度方向的分布。

由图10可知,三种试样中的残余压应力从表面沿深度方向的变化趋势均是先增大到最大,然后逐渐减小到0,再变成残余拉应力,拉应力增大到最大,然后逐渐减小到0。相对于LSP试样来说,SP

试样的表面残余压应力和最大残余压应力更高,但残余压应力层的深度仅为 0.28 mm ,小于LSP试样的(LSP试样的残余压应力深度为 1.31 mm),而复合强化则是融合了两者的优点。在三种试样中,SP+LSP试样的表面残余压应力、峰值残余压应力和残余压应力层的深度均最大,强化效果最好。结合DFR试验结果可知,表层残余应力对 $\text{DFR}_{\text{cutoff}}$ 的影响是表面残余应力与残余应力层深度综合作用的结果:虽然激光冲击强化后的表面残余应力小于喷丸强化,但残余应力层深度远大于喷丸强化,此时残余应力层深度起主要作用,因此,激光冲击强化的强化效果好于喷丸强化,采用激光强化处理的TC4材料的 $\text{DFR}_{\text{cutoff}}$ 比采用喷丸强化处理的高一些。复合强化后材料表面的残余应力最大,残余应力层深度也最深,因此强化效果最好,此工艺处理的TC4钛合金的 $\text{DFR}_{\text{cutoff}}$ 最大。

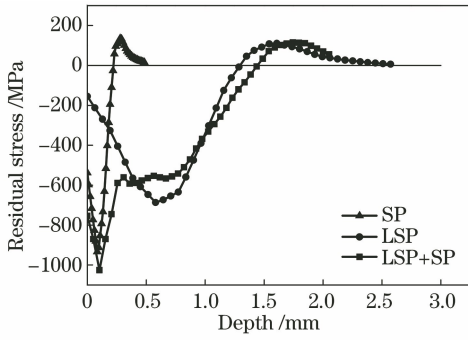


图 10 三种状态 TC4 钛合金试样中残余应力沿厚度方向的分布

Fig. 10 Distribution of residual stress in three kinds of strengthened TC4 titanium alloy samples along thickness direction

5 结 论

喷丸强化和激光冲击强化均能在 TC4 钛合金表层产生残余压应力,从而较大幅度地提高钛合金的疲劳性能。激光冲击强化产生的残余压应力层更深,对疲劳性能的改善也更为明显。

激光冲击和喷丸复合强化不仅进一步增大了 TC4 钛合金表面的残余压应力,同时也使得残余压应力层更深。因此,复合强化后 TC4 钛合金的 DFR_{cutoff} 提高的幅度最大,这表明采取复合强化处理得到的结构的细节疲劳性能最好。

相比于未强化试样,复合强化试样在疲劳应力水平提高 37.9% 的情况下,特征寿命提高了 53.7%, DFR_{cutoff} 可以达到 466.61 MPa,这说明复合强化极大地提高 TC4 钛合金的疲劳强度和疲劳寿命。

参 考 文 献

[1] Yang Y J, Zhang X Y, Sun Z H, et al. Galvanic corrosion and protection of TC4 titanium alloy thick plate [J]. Equipment Environmental Engineering, 2016, 13(4): 149-156.
杨勇进, 张晓云, 孙志华, 等. TC4 钛合金厚板电偶腐蚀与防护研究 [J]. 装备环境工程, 2016, 13(4): 149-156.

[2] Zhang C Z, Yang J, Wei L, et al. Shot-peened residual stress of aeroengine titanium alloy blades [J]. Surface Technology, 2016, 45(4): 208-212.
张彩珍, 杨健, 魏磊, 等. 航空发动机钛合金叶片喷丸强化残余应力研究 [J]. 表面技术, 2016, 45(4): 208-212.

[3] Yao Y H, Liu J N, Ma L, et al. Detail fatigue rating cutoff values of casting TC4 alloy [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2009, 38(9): 1530-1532.

要玉宏, 刘江南, 马丽, 等. 铸造 TC4 钛合金细节疲劳强度 DFR_{cutoff} 的研究 [J]. 稀有金属材料与工程, 2009, 38(9): 1530-1532.

[4] Gao Y K. Effect of shot-peening on microstructure of TC4 titanium alloy [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2010, 39(9): 1536-1539.
高玉魁. 喷丸强化对 TC4 钛合金组织结构的影响 [J]. 稀有金属材料与工程, 2010, 39(9): 1536-1539.

[5] Zhao X Y, Chen X X, Meng H Y. Application of shot peening technology on lifetime extension repair of an actuator cylinder [J]. Equipment Environmental Engineering, 2018, 15(12): 87-90.
赵西洋, 陈晓秀, 孟海英. 喷丸强化技术在某型作动筒延寿修理中的应用 [J]. 装备环境工程, 2018, 15(12): 87-90.

[6] Wu Q, Xie D J, Jia Z M, et al. Effect of shot peening on surface residual stress distribution of SiCp/2024Al [J]. Composites Part B: Engineering, 2018, 154: 382-387.

[7] Wang J, Li M, Wang J X, et al. Effects of laser shock processing on fatigue life of 304 stainless steel [J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(1): 0102003.
汪军, 李民, 汪静雪, 等. 激光冲击强化对 304 不锈钢疲劳寿命的影响 [J]. 中国激光, 2019, 46(1): 0102003.

[8] Chen B, Zhang X Q. Effect of laser shock peening on surface performance of slewing bearing steel 42CrMo [J]. Surface Technology, 2019, 48(2): 62-68.
陈彬, 张兴权. 激光冲击强化对回转支承用钢 42CrMo 表面性能的影响 [J]. 表面技术, 2019, 48(2): 62-68.

[9] Huang S, Wang Z W, Sheng J, et al. Characteristics of residual principal stress distribution on surface around hole of IN718 alloy subjected to laser peening [J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(2): 0202004.
黄舒, 王作伟, 盛杰, 等. 激光喷丸强化 IN718 合金孔周表面残余主应力分布特性 [J]. 中国激光, 2017, 44(2): 0202004.

[10] Cao Z W, Zhang J, Che Z G, et al. Residual stresses of compound strengthening case on TC17 titanium alloy by laser peening and shot peening [J]. Surface Technology, 2018, 47(11): 80-84.
曹子文, 张杰, 车志刚, 等. 激光冲击与喷丸复合强化 TC17 钛合金表层残余应力研究 [J]. 表面技术, 2018, 47(11): 80-84.

[11] Kumar S A, Sundar R, Raman S G S, et al. Influence of laser peening on microstructure and fatigue lives of Ti-6Al-4V [J]. Transactions of

- Nonferrous Metals Society of China, 2014, 24(10): 3111-3117.
- [12] Sun R J, Li L H, Zhu Y, et al. Fatigue of Ti-17 titanium alloy with hole drilled prior and post to laser shock peening [J]. Optics & Laser Technology, 2019, 115: 166-170.
- [13] Du Y, Ma Y E, Gou L, et al. Study on residual stress distribution of 7050 aluminum sheet with groove after laser shock peening [J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2019, 37(4): 643-649.
杜永, 马玉娥, 苟磊, 等. 激光强化后 7050 凹槽铝板的残余应力分布规律研究 [J]. 西北工业大学学报, 2019, 37(4): 643-649.
- [14] Tian X L, Zhou J Z, Li J, et al. Effect of cryogenic laser peening on microstructure of 2024-T351 aluminum alloy [J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(9): 0902004.
田绪亮, 周建忠, 李京, 等. 深冷激光喷丸强化对 2024-T351 铝合金微观组织的影响 [J]. 中国激光, 2019, 46(9): 0902004.
- [15] Aviation Industry Corporation of China, Limited. Test method for cut-off value of detail fatigue rated strength of metallic materials: HB 7110—1994 [S]. Beijing: Chinese Industrial Standards Press, 1994.
中国航空工业总公司. 金属材料细节疲劳额定强度截止值 DFR_{cutoff} 试验方法: HB 7110—1994 [S]. 北京: 中国工业标准出版社.
- [16] Akita K, Hayashi K, Takeda K, et al. Relaxation behavior of laser-peening residual stress under tensile loading investigated by X-ray and neutron diffraction [J]. Mechanical Engineering Journal, 2014, 1(4): SMM0029.
- [17] Gao Y K. Influence of different surface modification treatments on surface integrity and fatigue performance of TC4 titanium alloy [J]. Acta Metallurgica Sinica, 2016, 52(8): 915-922.
高玉魁. 不同表面改性强化处理对 TC4 钛合金表面完整性及疲劳性能的影响 [J]. 金属学报, 2016, 52(8): 915-922.
- [18] Jiang S Q, Zhou J Z, Wu J H, et al. Research on fatigue properties of ZK60 wrought magnesium alloy treated by laser shot peening [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2012, 49(8): 081403.
蒋素琴, 周建忠, 吴建华, 等. 激光喷丸强化 ZK60 变形镁合金的疲劳性能研究 [J]. 激光与光电子学进展, 2012, 49(8): 080413.
- [19] Johnson G R, Cook W H. Fracture characteristics of three metals subjected to various strains, strain rates, temperatures and pressures [J]. Engineering Fracture Mechanics, 1985, 21(1): 31-48.
- [20] Jiang C Y, Huang L, Wang J C, et al. Simulation analysis of the residual stress field of TC4 Ti alloy under laser shock peening and shot peening [J]. Surface Technology, 2016, 45(4): 5-9, 52.
蒋聪盈, 黄露, 王婧辰, 等. TC4 钛合金激光冲击强化与喷丸强化的残余应力模拟分析 [J]. 表面技术, 2016, 45(4): 5-9, 52.
- [21] Zhou J Z, Yang X D, Huang S, et al. Residual stress field of ZK60 specimen with central hole induced by both-side laser shot peening [J]. Chinese Journal of Lasers, 2010, 37(7): 1850-1855.
周建忠, 杨小东, 黄舒, 等. 双面激光喷丸强化 ZK60 镁合金的残余应力数值研究 [J]. 中国激光, 2010, 37(7): 1850-1855.
- [22] Hu Y X, Yao Z Q, Hu J. Numerical simulation of residual stress field for laser shock processing [J]. Chinese Journal of Lasers, 2006, 33(6): 846-851.
胡永祥, 姚振强, 胡俊. 激光冲击强化残余应力场的数值仿真分析 [J]. 中国激光, 2006, 33(6): 846-851.
- [23] Zhang X Q, Chen L S, Li S Z, et al. Investigation of the fatigue life of pre- and post-drilling hole in dog-bone specimen subjected to laser shot peening [J]. Materials & Design, 2015, 88: 106-114.